

Seguimiento del estado hídrico de un olivar superintensivo utilizando imágenes termográficas y multiespectrales de alta resolución

Flavio Capraro¹[\[0000-0002-8915-1029\]](https://orcid.org/0000-0002-8915-1029), Santiago Tosetti¹, Pedro Campillo¹,
Vicente Mut¹, Pierluigi Pierantozzi²

¹ Instituto de Automática INAUT (UNSJ – CONICET)
Av. Lib. Gral. San Martín 1112 (o), Ciudad Capital, San Juan, ARGENTINA

`fcapraro@inaut.unsj.edu.ar ; stosetti@inaut.unsj.edu.ar ;
campillo@inaut.unsj.edu.ar ; vmut@inaut.unsj.edu.ar`

² CONICET - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA San Juan)
Calle 11 y Vidart. Departamento Pocito, San Juan, ARGENTINA

`pierantozzi.pierluigi@inta.gob.ar`

Resumen. En el contexto de las nuevas tecnologías de Agricultura Digital, se utilizan imágenes de temperatura y multiespectrales para analizar y monitorear el estado hídrico de los cultivos. Estas imágenes se obtienen con cámaras termográficas y multiespectrales montadas en drones, satélites o estructuras fijas. En zonas donde se requiere el uso de sistemas de riego, los indicadores térmicos del cultivo son fundamentales para optimizar el riego. En este estudio, se monitoreó el estado hídrico de un olivar superintensivo con riego por goteo, utilizando mapas térmicos, CWSI y NDVI. Se aplicaron cuatro tratamientos de riego con diferentes niveles de reposición (100%, 70%, 50% y 25%) con el objetivo de generar variabilidad en el estado hídrico entre las parcelas de olivo. Las imágenes se tomaron durante seis días de la campaña 2024/25 con una cámara termográfica FLIR VueProR 640 y una cámara multiespectral Micasense RedEdge, ambas montadas en un dron. Se presenta la metodología de trabajo para la reconstrucción de ortomosaicos y el diseño de los mapas, junto con la descripción de las herramientas de software utilizadas en cada etapa de procesamiento. Finalmente, se muestran los mapas georreferenciados de alta resolución de la temperatura del cultivo, CWSI y NDVI, como así también la evolución de los índices durante la campaña.

Palabras claves: Riego de Precisión, Estrés Hídrico, Termografía, Agricultura Digital, Olivos.

Thermal and multispectral hi-resolution images for water stress monitoring in a super intensive olive crop

Abstract. In the context of Digital Agriculture technologies, temperature and multispectral images are used to analyze and monitor crop water status. These

images are obtained using thermographic and multispectral cameras mounted on drones, satellites, or fixed structures. Thermal indicators help optimize irrigation in areas with irrigation systems. This study monitored the water status of a super-intensive olive grove with drip irrigation using thermal maps, CWSI, and NDVI. Four irrigation treatments with different replenishment levels (100%, 70%, 50%, and 25%) were applied to observe the effects on irrigation variability. Images were taken during six days of the 2024/25 campaign with cameras mounted on a drone. The methodology for reconstructing Orthomosaics and designing maps is presented, along with the description of the software tools used. Finally, high-resolution georeferenced maps of crop temperature, CWSI, and NDVI and their evolution during the campaign are shown.

Keywords: Precision Irrigation, Water Stress, Thermal images, Digital Agriculture, Olives.

1 Introducción

En los últimos años, bajo las premisas de la olivicultura moderna, las nuevas plantaciones de olivos se desarrollaron con gran atención en la elevada densidad de plantación y en la alta tecnificación en el uso de sistema de riego presurizado y mecanización, entre otros aspectos [1]. Esto conlleva a que los nuevos sistemas de cultivos sean superintensivos, con plantaciones de alta densidad y conducción en seto, con el objetivo de facilitar la cosecha y la recolección mecanizada [2][3]. El olivo es un cultivo característico del Mediterráneo, resistente a la sequía, cultivado tradicionalmente en secano, sin embargo, se ha determinado que la falta de agua en momentos críticos durante las fases sensibles del desarrollo afecta el crecimiento y la producción [4].

La olivicultura, como actividad agrícola de importancia económica, social y ambiental enfrenta importantes desafíos asociados al cambio climático, la escasez del recurso hídrico, la mejora en calidad, y la necesidad de optimizar los procesos de gestión agronómica [5]. Particularmente en la provincia de San Juan se enfrenta una grave crisis hídrica que impacta desfavorablemente a la agricultura por la baja disponibilidad de agua; ello amerita realizar la correcta gestión del recurso hídrico y evolucionar de forma rápida hacia nuevas técnicas de “Riego de Precisión” con tecnologías modernas que faciliten el proceso dinámico y continuo de análisis de información sobre: el clima, requerimientos hídricos del cultivo, estado del suelo y del riego.

En la gestión del riego es conveniente analizar periódicamente la uniformidad de la parcela. En el contexto antes mencionado, la agricultura digital se presenta como una estrategia clave para aumentar la eficiencia en la producción, mejorar la sostenibilidad del cultivo del olivo y proveer adecuadamente el riego [6][7]. Entre las tecnologías más prometedoras se encuentran las herramientas de teledetección que utilizan imágenes térmicas y multiespectrales de la zona cultivada a fin de monitorear diferentes variables fisiológicas y biofísicas de los cultivos [8]. Estas tecnologías ofrecen una alternativa no destructiva y de alta resolución para evaluar el estado hídrico, vigor vegetal, enfermedades y otros factores que afectan el rendimiento productivo.

Las imágenes térmicas son útiles para la detección de estrés hídrico, ya que la tem-

peratura del dosel vegetal se encuentra directamente relacionada con la transpiración de la planta. Diversos estudios emplean índices como el Crop Water Stress Index (CWSI) [9] para estimar el nivel de estrés en olivares y ajustar el riego [10][11]. En complemento, las imágenes multiespectrales que permiten capturar la reflectancia en bandas específicas del espectro electromagnético, han sido utilizadas para calcular índices de vegetación como el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y el Red-Edge NDVI, que permiten caracterizar el vigor y la biomasa del cultivo [12].

El desarrollo de plataformas aéreas no tripuladas (UAVs) y de satélites, junto con sensores cada vez más accesibles y precisos, ha favorecido la expansión de estas tecnologías en explotaciones agrícolas tanto intensivas como extensivas, permitiendo el monitoreo a nivel de planta y con ello evaluar la variabilidad espacial y temporal del estado del cultivo. Hoy en día, se busca afrontar y avanzar mediante diferentes investigaciones los desafíos relacionados con la integración de datos, la estandarización de metodologías de procesamiento, la interpretación agronómica de los resultados y la transferencia tecnológica al sector productivo, particularmente el olivícola [13].

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología de trabajo y las herramientas informáticas utilizadas para lograr la determinación del CWSI y NDVI representados en mapas mediante el uso de imágenes térmicas y multiespectrales de alta resolución. El estudio se ha realizado en un olivar situado en la provincia de San Juan donde se aplicaron cuatro tratamientos de riego para generar distintas condiciones en el estado hídrico del olivar. Finalmente se presentan los mapas para 6 días de la campaña 2024-25 y un breve análisis sobre las oportunidades y alcances de la tecnología utilizada.

2 Métodos y materiales

2.1 Lugar de experimentación en campo

La experimentación a campo se realizó en un olivar superintensivo (cv. Arbosana), con marco de plantación de 4 m por 1,75 m (figura 1), situado en la estación experimental de INTA San Juan (31° 39' 32,57'' S; 68° 35' 22.82'' O; 620 msnm). El clima de la región es semiárido, con alto nivel de evapotranspiración diaria y bajo aporte de lluvias (100 mm anuales) [14]. El olivar se dividió en dos sectores (Bloque 1 y Bloque 2) de iguales dimensiones y características que corresponden a dos repeticiones.



Fig. 1. Fotografía lateral del olivar superintensivo (4m x 1,75m), INTA EEA San Juan.

2.2 Tratamientos de riego y gestión del riego

Como se observa en la figura 2, dentro de cada bloque se sitúan 4 parcelas de riego que están conformadas por 3 líneas de olivos. En cada parcela se aplica un tratamiento de riego con el objetivo de diferenciar las condiciones hídricas dentro del olivar.

Se instaló un sistema de riego por goteo, con emisores de 4 L/h de capacidad y separación de 80 cm, con un lateral de riego por cada línea de plantas. Se subdividió en cuatro unidades para lograr el riego diferenciado de cada parcela.

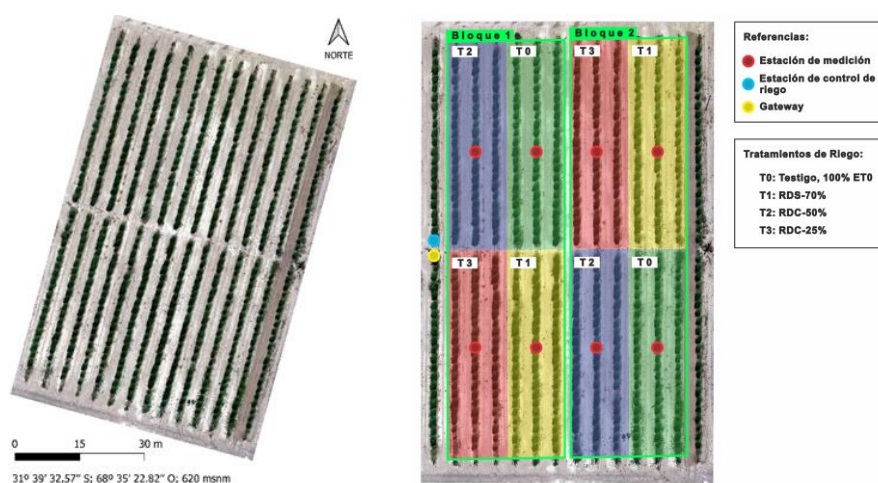


Fig. 2. Imagen aérea del olivar y demarcación de la zona de estudio en dos repeticiones y de las parcelas donde se aplican cuatro tratamientos de riego diferenciado (T0, T1, T2 y T3).

La programación de los turnos de riego se determinó con el objetivo de reponer el 100 % de las necesidades hídricas del cultivo (ET_c) [15], en base a la evapotranspiración de referencia (ET₀) diaria y al coeficiente de cultivo (K_c) según (1).

$$ET_c [mm] = ET_0 * K_c \quad (1)$$

Se definieron cuatro tratamientos de riego diferenciados, según se indica:

T0: *Tratamiento testigo RDS-100.* Reposición del 100 % de la ET_c durante el año.

T1: *Tratamiento riego deficitario sostenido.* Se repone 70 % de ET_c durante el año.

T2: *Tratamiento con riego deficitario controlado RDC-50.* Reposición del 50 % de la ET_c. Excepto durante los períodos críticos que se repone el 100 % de ET_c.

T3: *Tratamiento con riego deficitario controlado RDC-25.* Reposición del 25 % de la ET_c. Excepto durante los períodos críticos que se repone el 75 % de ET_c.

ET₀ fue calculada con la metodología Penman–Monteith modificada propuesta por FAO [16]. El K_c fue variante, considerando el valor de 0,68 para el periodo entre los meses de septiembre a abril, y el valor de 0,4 para el periodo de mayo a agosto. El seguimiento del riego se realizó con el sistema de Telemetría Agrícola [17].

2.3 Adquisición de las imágenes y metodología de procesamiento

Las herramientas de sensado remoto basadas en la adquisición de imágenes de diferentes bandas espectrales permiten calcular índices del cultivo que se representan en un mapa con el objetivo de visualizar la variabilidad espacial en un momento determinado de la campaña. Los índices se determinan por la combinación de las imágenes disponibles, en [18] se presenta una revisión sobre los índices utilizados en la agricultura digital y detalles de cada uno. La metodología radica en realzar la cubierta vegetal en función de la respuesta espectral y atenuar la influencia de otros componentes como suelo, edificios, objetos, etc.. El resultado es una nueva imagen destacando las coberturas vegetales (densidad, área foliar, clorofila, y otros) [19].

El análisis espectral constituye un componente esencial en la aplicación del sensado remoto agrícola. Las imágenes multiespectrales y térmicas utilizadas en este trabajo explotan distintas regiones del espectro electromagnético con el fin de caracterizar propiedades del cultivo del olivo. Dos índices utilizados en la olivicultura son el NDVI y el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) [20]. En olivares con riego es importante conocer el estado hídrico estimando el CWSI propuesto en [9].

En el presente trabajo, se ha realizado el análisis espacial del olivar en base a la información de imágenes termográficas y multiespectrales de alta resolución. Para esto, primeramente, se realizó el levantamiento de imágenes aéreas del olivar con cámaras transportadas en un dron tipo cuatrirrotor, 3DR Robotics Solo (figura 3.a).

La adquisición de las imágenes se realizó con una cámara termográfica Flir Vue Pro-R 640 (7.5 - 13.5 μm) (figura 3.b) y una cámara multiespectral Micasense RedEdge (figura 3.c) de 5 bandas: azul (475 nm), verde (560 nm), rojo (668 nm), infrarrojo cercano (NIR) (717 nm), y borde rojo (Red Edge) (840 nm). En el terreno se ubicaron 9 marcas georreferenciadas (placas circulares de 30 cm de papel aluminio), con un sistema de posicionamiento global de precisión (GPS RTK) (figura 4.a).

Durante la campaña (agosto 2024 a abril 2025) se han efectuado diferentes vuelos para adquirir las imágenes, se han considerado seis días: 9/8/24, 30/10/24, 22/11/24, 22/1/25, 19/2/25 y 20/3/25. Los vuelos se iniciaron a las 13:30 hs (medio día solar). La planificación del vuelo se realizó con el software Mission Planner, recorrido de tipo grilla, altitud a 60 m, velocidad de avance de 5m/s, y solapamiento de imágenes del 80% vertical y horizontal. En la figura 5 se muestra la trayectoria planificada.

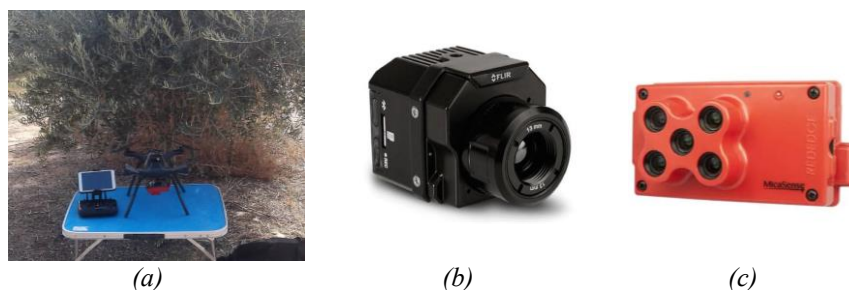


Fig. 3. Levantamiento de imágenes de la zona cultivada con un dron cuatrirrotor (a) equipado con una cámara termográfica (b) y una cámara multiespectral de 5 bandas (c).

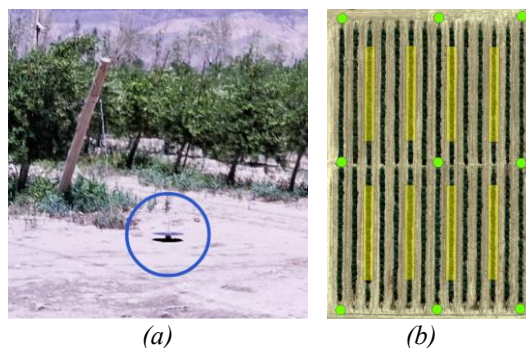


Fig. 4. Puntos de control en tierra (GPC) utilizados en el proyecto para georreferenciar y alinear los ortomosaicos obtenidos en las diferentes fechas de adquisición. (a) Fotografía de marcador ubicado en el lateral del olivar. (b) Localización de los 9 GPC (puntos verdes).



Fig. 5. Planificación de la trayectoria de vuelo del dron sobre el olivar de estudio.

La primera etapa del procesamiento consistió en fusionar las imágenes de cada conjunto (6 set con imágenes termográficas y 6 set con imágenes multiespectrales) para lograr un mapa u ortomosaico del olivar para cada fecha. Para ello se utilizó el software de fotogrametría digital Agisoft Metashape ver. 1.8. El procesamiento se realizó bajo las recomendaciones del proveedor [21] con la siguiente metodología:

- Inspección y análisis de calidad de las imágenes. Eliminación de imágenes fuera de foco y de los giros en los extremos de cada recorrido.
- Carga de imágenes y verificación de posicionamiento (figura 6.a).
- Orientación de las imágenes y primera reconstrucción de la nube de puntos.
- Optimización de parámetros de la cámara.
- Carga, ubicación y demarcación de los GCP en imágenes de referencia.
- Calibración y ajuste de reflectancia con un panel de calibración (figura 6.b).
- Creación de nube de puntos densa (figura 6.c).
- Selección y delimitación del espacio 3D de trabajo.
- Creación del modelo digital de elevación (DEM) (figura 6.d).
- Creación y exportación de ortomosaicos para cada banda (figura 6.e).

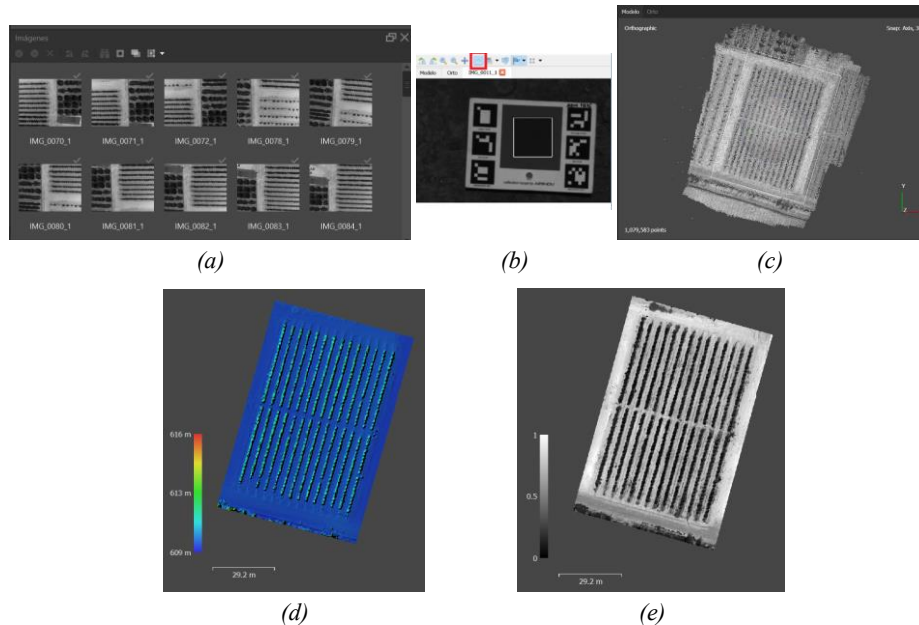


Fig. 6. Procesamiento de las imágenes para la generación de ortomosaicos. (a) Explorador de imágenes. (b) Asignación de máscara en panel de reflectancia. (c) Nube de puntos densa. (d) Modelo digital de elevación. (e) Ortomosaico georreferenciado y calibrado en reflectancia.

Los ortomosaicos resultantes requieren un nuevo ajuste de georreferenciación; esto se realizó con una herramienta de procesamiento de datos espaciales, denominado Sistemas de Información Geográfica (GIS). Se empleó el software QGIS versión 3.40.5. El ajuste se logró con el complemento de “Georeferenciación” de la herramienta GDAL y considerando los 9 GPC. La resolución aproximada es de 4 cm.

Posteriormente, en QGIS, se realizó el recorte del área de interés y la demarcación de la zona central de cada tratamiento (capa shape) de la cual se extraen los datos estadísticos necesarios. En la figura 5.b se muestra el área recortada y la capa que contiene las 8 zona de extracción de datos (demarcadas en rectángulos amarillos).

Seguidamente se analizaron y procesaron los mapas de temperatura y de las bandas multispectrales con el objetivo de calcular los índices NDVI y CWSI. Esto se logró por medio de algoritmos escritos en el lenguaje Python 3 y fue necesario integrar funciones de las librerías OsGeo, GDal, NumPy, SciPy, y Matplotlib. El editor utilizado fue Spyder 4, que se encuentra en la plataforma de desarrollo Anaconda.

El primer paso de este procesamiento es la extracción de la zona que contenga cultivo. Particularmente en el mapa térmico deben eliminarse los efectos de distorsión entre el cultivo y el suelo, conocido como “efecto corona” alrededor del cultivo [11]. Para diferenciar y extraer aquellos píxeles que únicamente corresponden a la vegetación se creó una capa de corte usando de base el mapa de NDVI, conformada por los píxeles mayores a un valor de umbral, el cual se establece empíricamente observando el histograma bimodal de mapa NDVI. En el trabajo dicho umbral fue de $NDVI > 0,4$.

Generada la capa de corte, se procede a extraer los píxeles del cultivo a fin de visualizar la variabilidad en el olivar y también para extraer los datos estadísticos de la zona central de cada tratamiento. Este último proceso se realizó con la herramienta de “*Estadística de Zonas*” disponible dentro de la biblioteca de procesos de Q-GIS.

Así, la metodología de cálculo de índices quedó establecida de la siguiente manera:

- Corregir la georeferenciación y posición de los ortomosaicos.
- Recortar el área de interés en todos los ortomosaicos.
- Demarcar la zona de extracción de datos estadísticos con el diseño de una capa.
- Calcular el NDVI y generar un mapa.
- Generar histograma bimodal del mapa de NDVI.
- Obtener una capa de corte a partir del mapa de NDVI (definir umbral de corte).
- Extraer en cada mapa los píxeles correspondientes al cultivo (capa de corte).
- Calcular el CWSI y generar un mapa.
- Generar el histograma de los mapas de temperatura, CWSI y NDVI.
- Extraer datos estadísticos de cada zona de estudio, para cada mapa generado.
- Analizar los datos obtenidos mediante procesos estadísticos.

2.6 Cálculo de los Índices NDVI y CWSI

El NDVI brinda información sobre la condición de la cobertura vegetal a través del análisis de la relación de la luz del infrarrojo cercano (NIR) y rojo visible (RED) (2). El rango de valores para el estudio de la vegetación es de 0 a 1. Valores próximos a 1 indican vegetación verde y activa, cercanos a 0 suelo desnudo o vegetación muerta.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

El CWSI se basa en la diferencia entre las temperaturas de la hoja y del aire normalizadas a la variación en las condiciones ambientales [9]. En [22] se define entre las temperaturas límites superiores e inferiores, T_{dry} y T_{wet} , que representan una hoja en estado de no transpiración y una hoja en estado completamente transpirando (3). El CWSI toma valores entre 0 y 1 indicando condiciones bien regadas o déficit hídrico.

$$CWSI = \frac{T_c - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (3)$$

Para el cálculo del índice se consideraron los valores indicados en la tabla 1. Las temperaturas de referencia se determinaron como: $T_{dry} = T_{aire} + 5^\circ\text{C}$ (según se realizó [23]), T_{wet} ha sido estimada como el promedio del 10% de los píxeles más fríos contenidos en el mapa termográfico [11], y T_c corresponde a cada píxel del mismo mapa.

Seguidamente se presentan los mapas de T_c , CWSI y NDVI, con el correspondiente histograma. En el histograma bimodal del mapa T_c se diferencia la zona con cultivo y suelo; en color naranja se distingue el histograma al aplicarse la capa de corte.

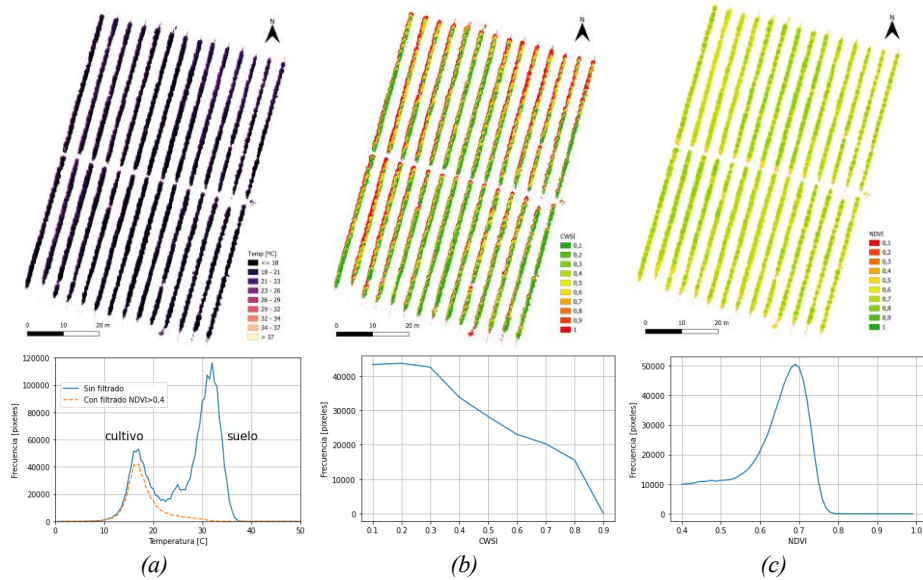


Fig. 7. Información correspondiente al día 9/8/2024. (a) Mapa térmico del cultivo e histograma. (b) Mapa de CWSI e histograma. (c) Mapa de NDVI e histograma.

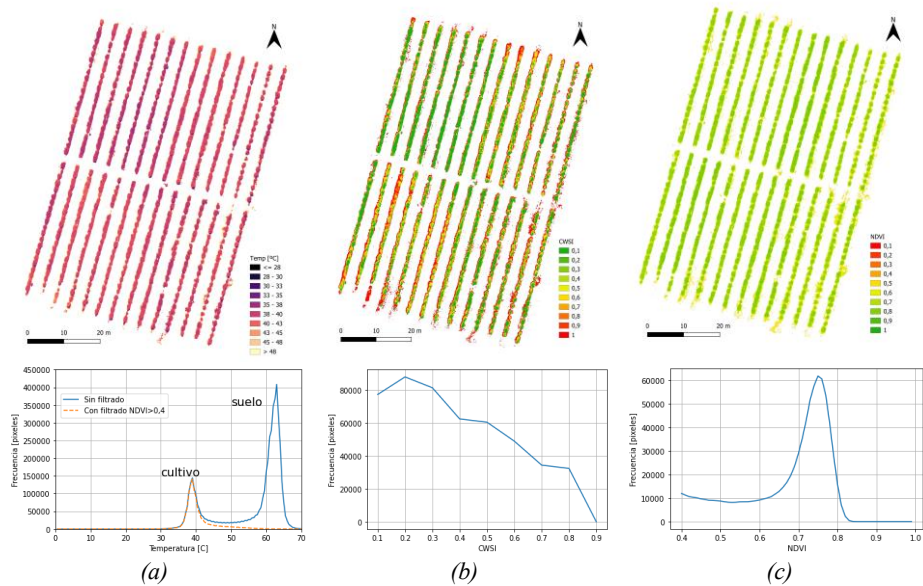


Fig. 8. Información correspondiente al día 30/10/2024. (a) Mapa térmico del cultivo e histograma. (b) Mapa de CWSI e histograma. (c) Mapa de NDVI e histograma.

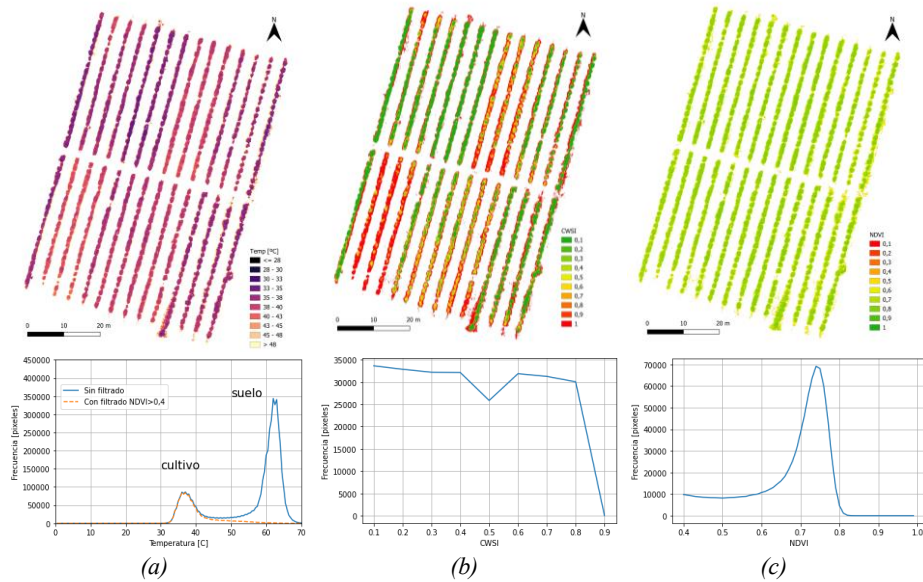


Fig. 9. Información correspondiente al día 22/11/2024. (a) Mapa térmico del cultivo e histograma. (b) Mapa de CWSI e histograma. (c) Mapa de NDVI e histograma.

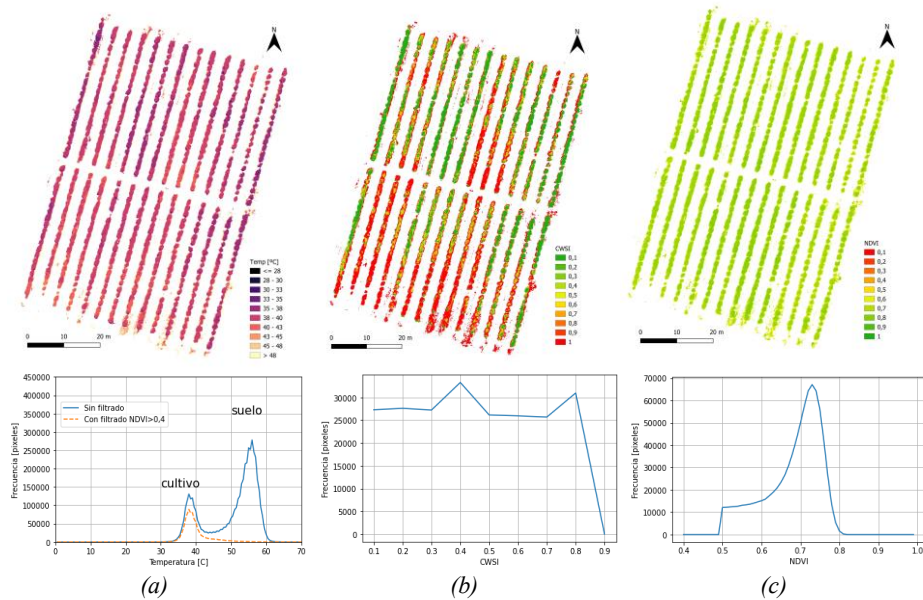


Fig. 10. Información correspondiente al día 22/11/2025. (a) Mapa térmico del cultivo e histograma. (b) Mapa de CWSI e histograma. (c) Mapa de NDVI e histograma.

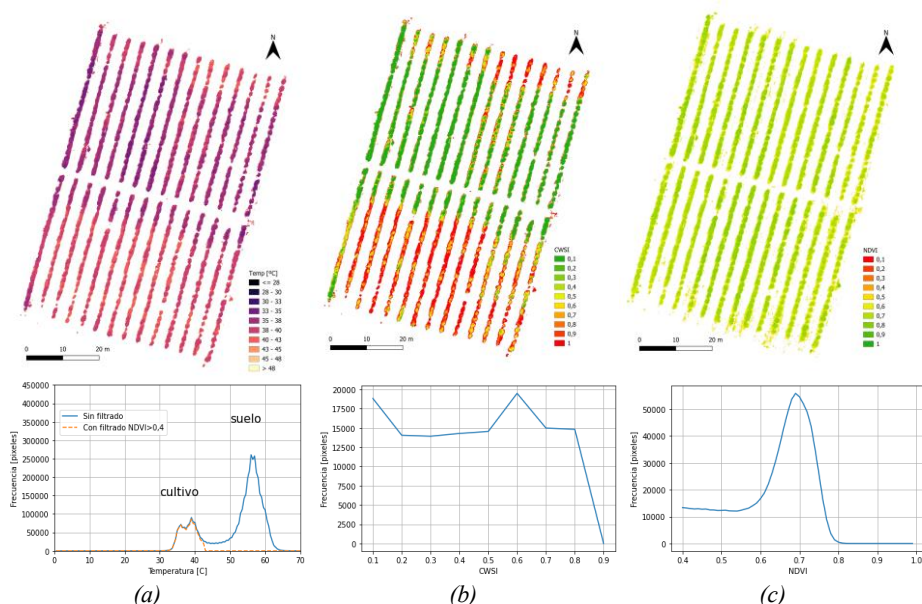


Fig. 11. Información correspondiente al día 19/2/2025. (a) Mapa térmico del cultivo e histograma. (b) Mapa de CWSI e histograma. (c) Mapa de NDVI e histograma.

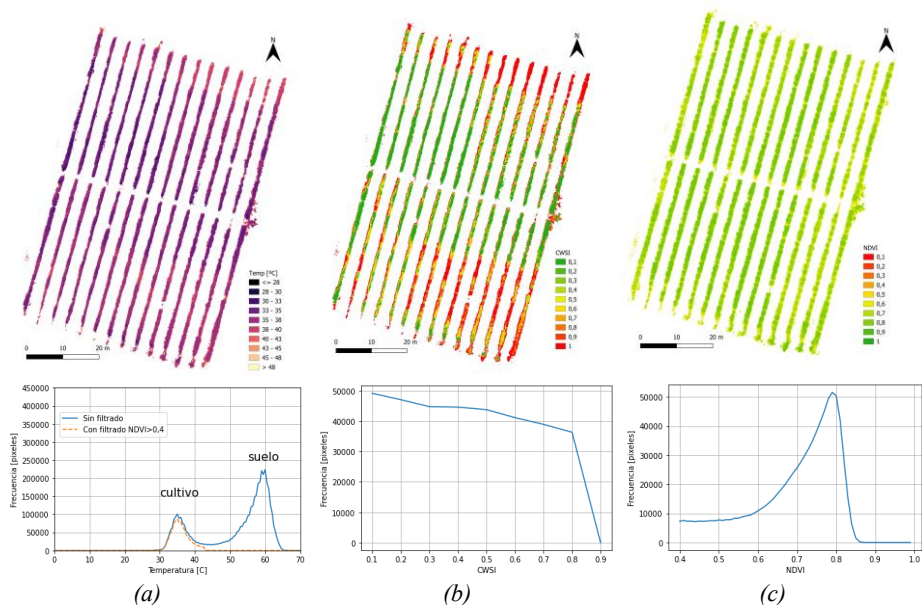


Fig. 12. Información correspondiente al día 20/3/2025. (a) Mapa térmico del cultivo e histograma. (b) Mapa de CWSI e histograma. (c) Mapa de NDVI e histograma.

Tabla 1. Parámetros utilizados en el cálculo de CWSI para cada día.

Fecha	Ambiente		Imagen Térmica		CWSI	
	Tair (°C)	Hair (%)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Twet (°C)	Tdry (°C)
9/8/2024	16	30	6	17,6	15,7	21
30/10/2024	36,5	23	28,1	40,4	38,6	41,5
22/11/2024	33,5	33	28,7	39,2	36,7	38,5
22/1/2025	34,5	24	29,1	39,5	37,8	39,5
19/2/2025	33,4	35	28,5	39,6	37,1	38,4
20/3/2025	32,3	34	20,5	36,5	34,5	37,3

3 Resultados

Se han extraído desde cada zona de estudio los valores promedios de Tc y NDVI obtenidos en los diferentes tratamientos de riego. En la tabla 2 y tabla 3 se presentan los valores obtenidos para los 6 días analizados durante la campaña; mientras que en la figura 13 se trazan las variaciones temporales de cada tratamiento.

Tabla 2. Valores promedio de temperatura de cultivo en los tratamientos de riego.

Fecha	B1-T0	B1-T1	B1-T1	B1-T3	B2-T0	B2-T1	B2-T2	B2-T3
9/8/2024	17,3	17,8	17,8	18,7	18,1	19,3	17,7	18,7
30/10/2024	39,3	41,4	41,4	41,6	41,5	40,9	40,8	40,3
22/11/2024	36,9	39,7	39,7	42,2	39,2	40,0	40,4	40,5
22/1/2025	38,2	39,7	39,7	40,7	39,5	39,3	40,4	39,5
19/2/2025	36,1	40,1	40,1	39,9	39,4	37,1	40,3	38,2
20/3/2025	34,3	36,7	36,7	36,2	37,2	36,3	37,0	35,9

Tabla 3. Valores promedio de NDVI para los diferentes tratamientos de riego.

Fecha	B1-T0	B1-T1	B1-T2	B1-T3	B2-T0	B2-T1	B2-T2	B2-T3
9/8/2024	0,65	0,62	0,60	0,65	0,62	0,62	0,61	0,66
30/10/2024	0,68	0,70	0,68	0,73	0,66	0,68	0,70	0,73
22/11/2024	0,69	0,69	0,69	0,69	0,67	0,68	0,69	0,70
22/1/2025	0,69	0,71	0,71	0,69	0,66	0,68	0,71	0,70
19/2/2025	0,66	0,69	0,64	0,63	0,63	0,64	0,66	0,63
20/3/2025	0,69	0,74	0,72	0,74	0,65	0,67	0,75	0,75

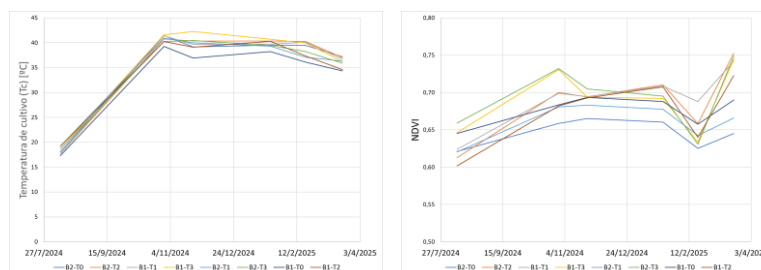


Fig. 13. Variabilidad temporal de los niveles (promedios) de temperatura del cultivo (Tc) y índice NDVI afectados por los diferentes tratamientos de riego durante la campaña 2024/25.

El enfoque del presente trabajo fue analizar el uso y manejo de las herramientas digitales disponibles para generar información sobre el estado hídrico de los olivares. En orden a ello, como principal resultado, se destaca la realización adecuada de mapas de la temperatura del olivo, CWSI y NDVI, generados a partir de diferentes conjuntos de imágenes termográficas y multiespectrales. Debido a la resolución de pixel de 4 cm, fue posible observar y analizar características a nivel de planta.

En analogía con las investigaciones [10][11][19][20], se observa en los mapas la alta sensibilidad y variabilidad espacial dentro del olivar, consecuencia de la aplicación diferenciada del riego. En los mapas de CWSI se identifican zonas con déficit hídrico elevado (en rojo). Así mismo, se visualiza en la tabla 2 y la figura 13.a la variación temporal de la respuesta del olivo. Ello indica que las herramientas utilizadas son apropiadas y los resultados son sensibles a los cambios en la programación del riego, evidenciándose las zonas con presencia de estrés hídrico severo.

En el caso del NDVI, se observó en los mapas y en la tabla 3 que es un índice poco sensible a los efectos de déficit hídrico para un mismo día, pero se logra observar la variación durante la campaña.

El análisis estadístico y específico de los datos corresponden a los aspectos agronómicos los cuales serán tratados en otros trabajos, por ello no fueron incluidos aquí.

5. Conclusiones

A partir de esta experiencia se puede demostrar que, empleando diferentes herramientas y software de fotogrametría y sistemas de información geográficas disponibles, se logró realizar adecuadamente el seguimiento de cada tratamiento de riego y, a su vez, la monitorización permanente del cultivo en cada parcela prestando especial atención en los periodos críticos del crecimiento del olivo, en donde las condiciones de riego y de estrés hídrico afectan al desarrollo del cultivo.

Las tecnologías y las nuevas herramientas de Agricultura Digital facilitan la toma de decisiones en la programación del riego. En regiones con escasez de agua, como es el caso de la provincia de San Juan, estas tecnologías podrían favorecer a mejorar la eficiencia del uso del agua agrícola y la productividad de las zonas cultivas bajo riego.

Se considera que la metodología para el tratamiento de las imágenes y generación de los ortomosaicos es apropiada. Esta metodología se puede abreviar en tres instancias. Primero corresponde al proceso de fotogrametría donde se realizó el análisis de calidad de las imágenes capturadas en campo con un dron y la construcción de los ortomosaicos calibrados en reflectancia. En segundo término, se modifican y adecuan los mapas originales y se calculan los índices de interés para obtener nuevos mapas georreferenciados de alta calidad. Por último, se hace la inspección visual de los mapas y la extracción de información estadística de las zonas de estudio.

Las herramientas tienen aplicaciones potenciales en la detección del estrés hídrico, monitoreo en el crecimiento de los olivos, y ajustes en la programación del riego, todo ello en el contexto de la agricultura de precisión y riego de precisión.

Referencias

1. Searles P., Agüero Alcarás M., Rousseaux M. (2011). El consumo de agua por el cultivo de olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea. *Ecología Austral* 21, 15-28.
2. Connor D. J., Gómez del Campo M., Rousseaux M. C., Searles P. S. (2014). Structure, management and productivity of hedgerow olive orchards: a review. *Sci. Hortic.* 169, 71–93.
3. Pastor M., García Vila M., Soriano M. A., Vega V., Fereres V. (2007). Productivity of olive orchards in response to tree density. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 82, 555–562.
4. Moriana A., Orgaz F., Pastor M., Fereres E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 425–431.
5. Fernández J. E. (2014). Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 158–179.
6. Zarco-Tejada, González-Dugo, Berni (2013). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322-337.
7. Capraro F., Tosetti S., Rossomando F., Mut V., Vita Serman F. (2018). Web-based system for the remote monitoring and management of precision irrigation: a case study in an arid region of Argentina. *Sensors* 18, 3847.
8. Mulla David J.: Twenty five years of remote sensing in precision agricultura (2013). Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering.*, 114(4), 358-371.
9. Idso S. B., Jackson R. D., Pinter Jr. P.J., Reginato R. J., Hatfield J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agr. Meteorology* 24, 45-55.
10. Sepulcre-Cantó G., Zarco-Tejada P. J., Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., de Miguel E., Villalobos F. J. (2006). Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136(1–2), 31–44.
11. Gonzalez-Dugo V., Zarco Tejada P., Nicolás E., Nortes P. A., Alarcón J. J., Intrigliolo D. S. (2013). Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agric* 14, 660–678.
12. López-Granados F., Torres-Sánchez J., Serrano N., Arquero O., Peña J. M. (2019). High-throughput system for the detection of early-season olive crop diseases using aerial imagery and deep learning. *Remote Sensing*, 11(21), 2542.
13. Sola-Guirado R. R., Castro-García S., Blanco-Roldán G. L., Gil-Ribes J. A. (2017). Application of precision agriculture technologies in olive groves: Evaluation of the benefits and adoption barriers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 48–60.
14. Gómez del Campo M., Morales Sillero A., Vita Serman F., Rousseaux M. C., Searles P. S. (2010). El olivar en los valles cálidos del Noroeste de Argentina. *Olivae* 114, 23-45.
15. Doorenbos J. y Pruitt W. O. (1976). Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, Roma, Italia.
16. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* Vol 56, Italy.
17. Capraro F., Campillo P., Gimenez R., Ortiz A., Gentili L., Pierantozzi P. (2024). Monitoreo de variables y gestión de estrategias de riego deficitario en un olivar superintensivo empleando nuevas tecnologías de Agricultura Digital. En actas del 16º Congreso Argentino de Agroinformática. 53 JAIIO. Bahía Blanca, Buenos Aires. Argentina.
18. Radočaj D., Obhodaš J., Jurišić M., Gašparović M. . (2020). Global open data remote sensing satellite missions for land monitoring and conservation: A review. *Land* 2020, 9, 402.
19. Gitelson A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology* 161(2), 165-173.
20. Colombo R., Bellingeri D., Fasolini D., Marino C. M. (2003). Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment* 86(1), 120-131.
21. Agisoft (2024): Tutorial: MicaSense RedEdge MX processing workflow (including Reflectance Calibration) in Agisoft Metashape Professional. Ultimo acceso a la web: 15/4/2025.
22. Jones H. C. (1992) *Plants and microclimate*, 2nd ed.. Capítulo: Crop water stress index, pp. 293–295. Cambridge. Cambridge University Press.
23. Ben-Gal A., Agam N., Alchanatis V., Cohen Y., Yermiyahu U., Zipori I., Presnov E., Spritsin. M., Dag A. (2009). Evaluating water stress in irrigated olives: Correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrigation Science*, 27, pp. 367-376.